

Stručni rad

Primljen: 21. 6. 2017.

Revidirana verzija: 30. 10. 2017.

Prihvaćen: 30. 1. 2018.

UDK: 343.983:53

005.334:614.841

doi:10.5937/nabepo22-14330

SIMULACIJE POŽARA NA MOTORNIM VOZILIMA U FORENZIČKOM INŽENJERSTVU

Darko Zigar¹

Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu

Milan Blagojević²

Fakultet zaštite na radu Univerziteta u Nišu

Radovan Radovanović³

Kriminalističko-policijska akademija, Beograd

Sažetak: Požari na motornim vozilima predstavljaju specifičnu oblast istraživanja u okviru naučne oblasti zaštite od požara. Značajno veći deo tog istraživanja posvećen je uzrocima požara na vozilima i načinima za njihovo utvrđivanje. Međutim, manja pažnja se posvećuje istraživanjima koja se odnose na potencijalni razvoj požara, kada do njega već dođe, i mogućnostima prenošenja požara na materijale i objekte koji se nalaze u blizini. Ovakav tip istraživanja ima za cilj određivanje „bezbednog“ rastojanja od vozila koje je u požaru u smislu da što kasnije dođe, ili da uopšte ne dođe do paljenja okolnog materijala, vozila i delova objekta u neposrednoj blizini.

Rezultati ovakvog tipa istraživanja mogu da se primene za određivanje „bezbednog“ rastojanja pri projektovanju parkinga, podzemnih garaža i uopšte prostora na kojima istovremeno može da se nađe više parkiranih vozila ili se u blizini nalazi neki objekat.

Ključne reči: *požar na vozilu, simulacija požara, Fire Dynamics Simulator (FDS), ekspertiza požara.*

¹ Docent, darko.zigar@znrfak.ni.ac.rs

² Redovni profesor, milan.blagojevic@znrfak.ni.ac.rs

³ Redovni profesor, radovan.radovanovic@kpa.edu.rs

Uvod

Istraživanje koje je prikazano u ovom radu je zasnovano na realnom požaru koji se dogodio pre dve-tri godine, pri čemu postoji i video-zapis požara (počev od razvijene faze požara do samog dogorevanja), koji su načinili očevici mobilnim telefonom. Poznati su svi podaci koji su relevantni za istraživanje, počev od tipa vozila, precizne lokacije vozila u odnosu na objekat u blizini i susedno vozilo, kao i podaci o njihovim požarnim opterećenjima i požarnim opterećenjima objekta u čijoj neposrednoj blizini su vozila bila parkirana. Osnovna svrha istraživanja je bila donošenje zaključka o tome pod kojim uslovima bi požar automobila koji je goreo, mogao da se prenese na susedni automobil, na spoljašnju stranu objekta, i eventualno, u unutrašnjost objekta.

Iako se radi o konkretnom požaru, za potrebe ovog rada podaci su uopšteni, a simulacija je urađena sa početkom koji se poklapa sa početkom faze razvijenog požara, tako da dobijeni rezultati (tok požara i posledice požara) mogu da se verifikuju na osnovu činjenica koje su zabeležene na video-snimku. Simulacija je urađena u programskom paketu *PiroSym (Fire Dynamics Simulator, FDS)*, a parametri simulacije i ostali detalji su opisani u radu.

1. Simulacioni model

Simulacioni model koji je opisan u daljem tekstu formiran je na osnovu istraživanja koja su poslednjih decenija rađena u svetu i koja su data u standardima, a pre svega se zasniva na podacima koji se odnose na brzinu oslobađanja toplote prilikom požara motornih vozila i na osnovu odgovarajuće maksimalne - vršne vrednosti količine oslobođene toplote.

Polazni parametri za simulaciju su preuzeti iz američkog standarda NFPA 502-2014 koji definiše brzinu oslobađanja toplote (HRR – eng. *Heat Release Rate*) pri požaru motornog vozila na dva načina - na osnovu podataka koji su dobijeni eksperimentom i kroz tzv. reprezentativne vrednosti, tabela 1.⁴

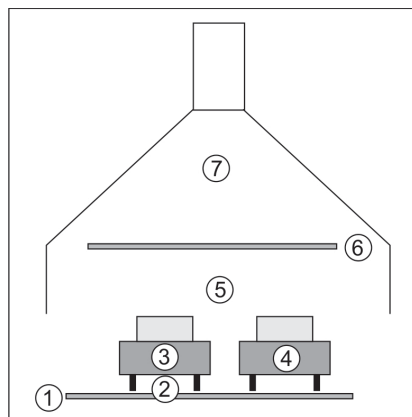
Američki standard u ovom delu takođe navodi da su eksperimenti pokazali da je požar na 60% putničkih vozila koja su korišćena u eksperimentu dostigao maksimalnu vrednost HRR za 20 minuta, i oko 85% u okviru pola sata od početka požara. Temperature koje su dostignute u eksperimentalnim požarima u ravni neposredno iznad vozila su bile u rasponu od 400 °C do 500 °C.

4 NFPA 502-2014 *Road tunnels, bridges, and other limited access highways*, Table A.11.4.1 Fire data for typical vehicles, pp. 34.

Tabela 1: Podaci o brzini oslobađanja toplote za tipična vozila

	Eksperimentalni HRR		Reprezentativni HRR	
	Maksimalna vrednost HRR [MW]	Vreme za dostizanje maks. vredn. HRR [min]	Maksimalna vrednost HRR [MW]	Vreme za dostizanje maks. vredn. HRR [min]
Putničko vozilo	5–10	0–54	5	10
Više putničkih vozila	10–20	10–55	15	20

Na drugoj strani, u Evropi su počev od 1995. i 1996. godine počela istraživanja ove problematike, pri čemu se kao reprezentativna izdvajaju istraživanja koja je u Francuskoj obavilo udruženje CTIMC i koja su kasnije dokumentovana u više radova (Schleich et al., 1999)⁵. Merenja HRR su obavljana u kalorimetru prikazanom na slici, gde su simulirani uslovi požara dva automobila na zatvorenom parkingu.



Slika 1: Realni izgled i šematski prikaz uslova eksperimenta: 1 – platforma za merenje gubitka mase, 2 – izvor paljenja, 3 – manje vozilo, 4 – veće vozilo, 5 – termoparovi za merenje temperature, 6 – tavanica na visini od 2,6 m, 7 – odvod produkata sagorevanja.

⁵ Schleich et al., *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks*, European Commission, Luxembourg, 1999.

Eksperimenti su izvođeni pod različitim uslovima ventilacije za požar jednog i dva vozila, a merenja su obuhvatala količinu oslobađane toplote i gubitak mase u jedinici vremena, toplotne flukseve i merenja temperature gasa i toksičnih produkata sagorevanja.

Ono što je od značaja za ovaj rad i predstavlja polaznu osnovu za simulaciju, jeste činjenica da su rezultati opisanih eksperimenata rezultirali klasifikacijom vozila u kategorije u odnosu na oslobođenu toplotnu energiju zavisno od mase vozila i, posledično, gubitka te mase u požaru, tabela 2.

Tabela 2: *Gubitak mase i oslobođena toplotna energija za pojedine kategorije vozila*

kategorija	masa [kg]	gubitak mase [kg]	oslobođena energija [MW]
1	850	200	6.000
2	1.000	250	7.500
3	1.250	320	9.500
4	1.400	400	12.000
5	1.400	400	12.000

Ukupno oslobođena toplotna energija za svaku kategoriju vozila je zasnovana na požaru vozila sa punim rezervoarom za gorivo. S obzirom da su kategorije vozila koje figurišu u tabeli 2 formirane na osnovu mase vozila, u istraživanju su navedene marke vozila pojedinih proizvođača i odgovarajući tipovi koji su bili u eksploataciji u vreme kada je istraživanje obavljano, tabela 3.

Tabela 3: *Marke i tipovi vozila nekih proizvođača i odgovarajuće kategorije*

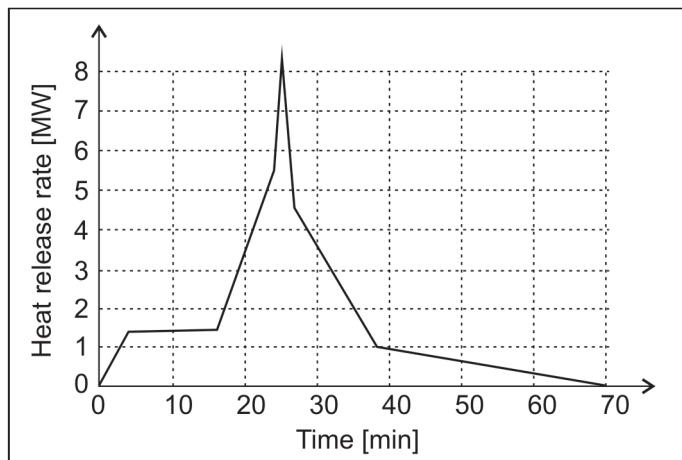
Marka	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 4	Kat. 5
Peugeot	106	306	406	605	806
Renault	Clio	Megan	Laguna	Safrane	Espace
Citroen	Saxo	ZX	Xantia	XM	Evasion
Ford	Fiesta	Escort	Mondeo	Scorpio	Evasion
Opel	Corsa	Astra	Vectra	Omega	Galaxy
Fiat	Punto	Bravo	Tempra	Croma	Frontera
Wolkswagen	Polo	Golf	Pasat	//	Sharan

Iako neki tipovi vozila koji su navedeni u tabeli 3 danas više nisu u upotrebi, u skladu sa tabelom 2 moguće je klasifikovati današnje tipove automobila.⁶

⁶ Automobil koji je bio predmet veštačenja i čiji požar je predmet simulacije opisane u radu je bio starijeg tipa i naveden je u tabeli.

Na osnovu opisanog istraživanja konstruisana je referentna kriva brzine oslobađanja toplote za jedan automobil, nezavisno od marke putničkog vozila, i ona se i danas koristi u inženjerskim proračunima, slika 2.

Bez obzira na činjenicu da je NFPA standard najdetaljniji i najobimniji u ovoj oblasti, treba imati u vidu da su gabariti i struktura vozila na američkom tržištu drugačija od evropskih vozila, pa je istraživanje u ovom radu zasnovano na podacima koji su navedeni u tabelama 2 i 3 i na osnovu prikazane referentne krive.



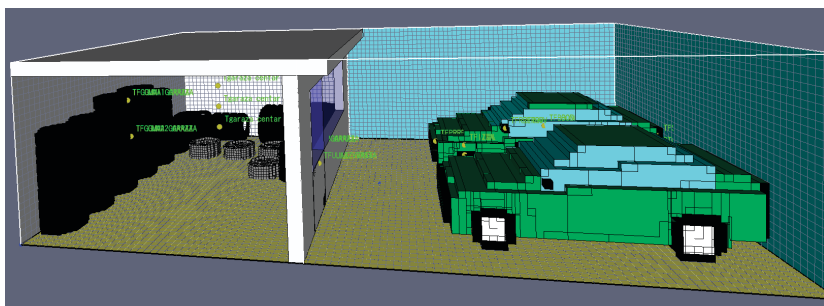
Slika 2: Predložena referentna kriva brzine oslobađanja toplote za jedan automobil

Sa referentne krive se vidi da se količina oslobođene toplote od 6 MW postiže posle nešto više od 20 minuta, tako da su to i bili polazni podaci za simulaciju. Ovakvom pristupu ide u prilog i već pomenuta činjenica da postoji video-snimak požara o kome je reč u radu, i da se sa snimka vidi da je faza razvijenog požara nastupila otprilike posle 20 minuta.

Da bi se postiglo da simulacija krene odmah sa razvijenim požarom, duž automobila je postavljen odgovarajući broj izvora paljenja („burnera“). Numerička mreža za simulaciju je definisana preko elementarnih zapremina sa dimenzijom ivice od 0,1 m. Treba napomenuti da smanjivanje dimenzija elementarnih zapremina ne vodi ka dobijanju značajno preciznijih rezultata, a pritom eksponencijalno povećava vreme potrebno za simulaciju bez obzira na performanse današnjih računara.

Na slici 3 je prikazan simulacioni model koji uključuje pored automobila koji je goreo, susedni parkirani automobil rastojanju od 80 cm. Automobil koji je goreo se nalazio ispred ulaznih vrata objekta na udaljenosti od 1,8 m od fasade objekta. Ulazna vrata objekta su bila metalna u donjoj trećini, dok su

gornje dve trećine vrata bile zastakljene poznatim površinama koje su uključene u simulaciju. Sam objekat (radionica) sadržao je požarno opterećenje oko 1.000 MJ/m^2 , tako da je pored pitanja koje se odnosilo na temperature koje su vladale na susednom automobilu, trebalo odgovoriti i na to da li je požar mogao da se prenese u unutrašnjost objekta, Osim metala i stakla, u simulaciji od materijala učestvuje i beton za zidove objekta. Požarno opterećenje u objektu je definisano nizom naslaganih automobilskih guma uz spoljni zid i u unutrašnjosti garaže.



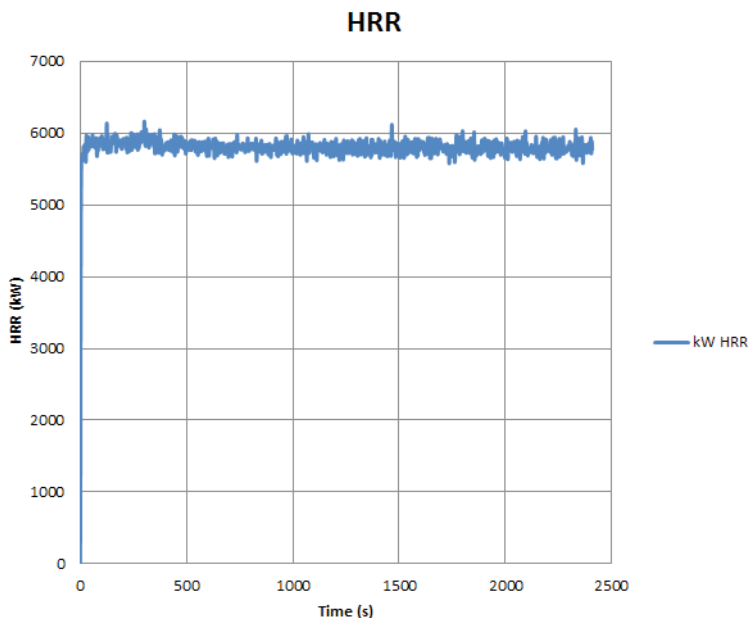
Slika 3: Izgled simulacionog modela

Merenje vrednosti koje se dobijaju simulacijom (temperatura, incidentni toplotni fluks), obavljano je senzorima koji se nalaze na susednom automobilu, fasadi, ulaznim vratima i u unutrašnjosti garaže. Najveći broj senzora je postavljen na susednom automobilu, i to:

- po jedan senzor na prednjem i i zadnjem točku,
- po jedan senzor iznad prednjeg i zadnjeg točka,
- jedan senzor na bočnom staklu,
- jedan senzor na retrovizoru,
- jedan senzor na prednjem delu automobila – prednja maska i
- jedan senzor na zadnjem delu automobila – ‘štop’ svetlo.

Na spoljnoj strani objekta senzori su postavljeni na vratima (na metalnom delu, pošto staklo puca već na samom početku simulacije i na zidu, dok su u unutrašnjosti garaže senzori postavljeni na više mesta, i to na visinama od 1, m, 1,4 m i 1,8 m). Lokacije nekih od postavljenih senzora se takođe mogu videti na slici 3, dok su precizne lokacije svih senzora date delu rada koji se odnosi na rezultate simulacije.

Pošto se početak simulacije poklapa sa početkom razvijene faze požara na automobilu (20 minuta od samog početka požara), uzeto je da količina toplote koja se oslobađa u vremenu iznosi 6 MW za sve vreme trajanja simulacije od 2400 s, slika 4.



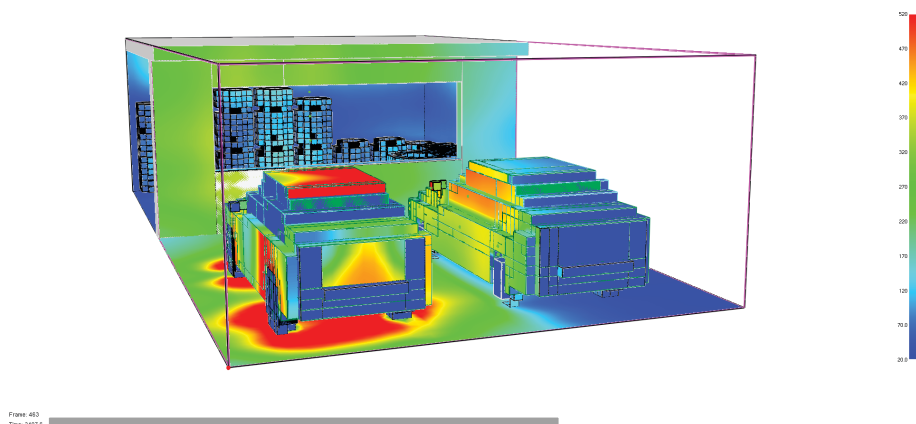
Slika 4: Brzina oslobađanja toplote tokom trajanja simulacije

2. Rezultati simulacije

Kao što je već rečeno, kreće sa početkom razvijene faze požara, u 20 minuta od početka paljenja i traje narednih 40 minuta (2.400 s) sa količinom oslobođene toplote od 6 MW tokom trajanja simulacije. U ovom delu je prikazano nekoliko ekrana preuzetih iz modula *Smokeview* programa koji čine sastavni deo programskog paketa *Fire Dynamics Simulator (FDS)*.

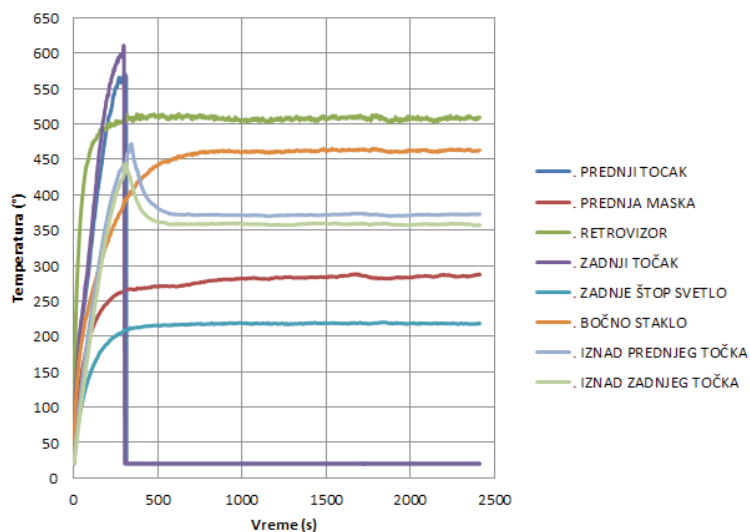
Kao dva osnovna parametra koji treba da posluže za donošenje pouzdanog zaključka u kojoj meri će doći prenošenja požara na susedni automobil i na objekat, za analizu je uzeta *temperatura* u pojedinim oblastima simulacionog prostora i *incidentni toplotni fluks*.

Iako slike (ekrani) koji su izdvojeni tokom simulacije u potpunosti vizuelno ilustruju raspodelu temperature u pojedinim oblastima simulacionog prostora (slika 5), sa grafika se precizno očitavaju zabeležene vrednosti za oba navedena parametra.



Slika 5: *Raspodela temperature na kraju simulacije*

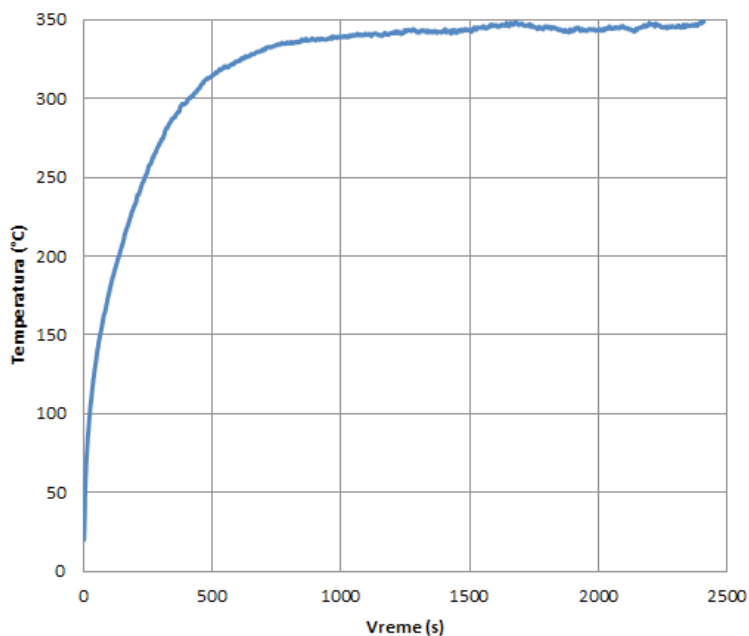
Na sledećim graficima su prikazane vrednosti temperature koja je izmerena na senzorima tokom trajanja simulacije. Kao što se vidi sa slike 6, ne računajući „pikove“ koji su izmereni na prednjem i na zadnjem točku, relativno konstantna visoka temperatura je izmerena na retrovizoru (oko 500°C), bočnom staklu automobila (oko 460°C) i iznad prednjeg i zadnjeg točka (360–370°C).



Slika 6: *Temperature na susednom automobilu tokom trajanja simulacije*

Kada je u pitanju objekat ispred koga se nalazio parkirani automobil u požaru, temperatura na vratima (na metalnom delu, pošto je staklo uništeno

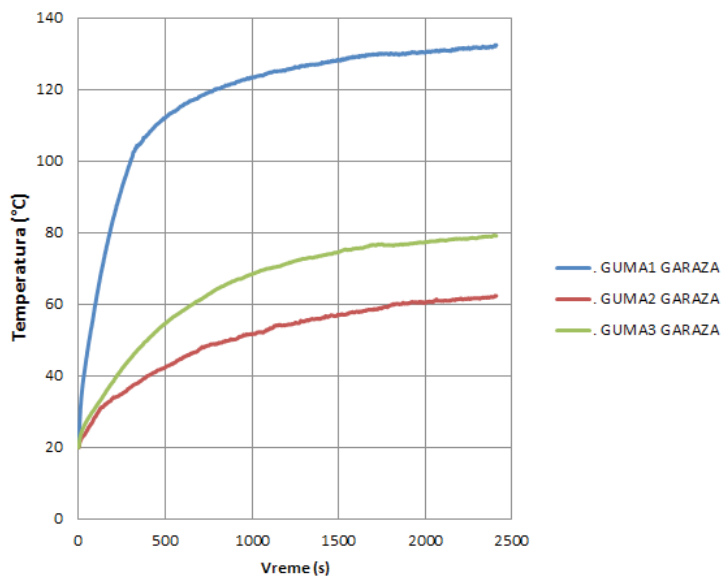
već pre početka razvijene faze požara) dostiže u prvih 10 minuta vrednost od oko 320°C koja se vrlo malo povećava do kraja simulacije (350°C na samom kraju simulacije), slika 7.



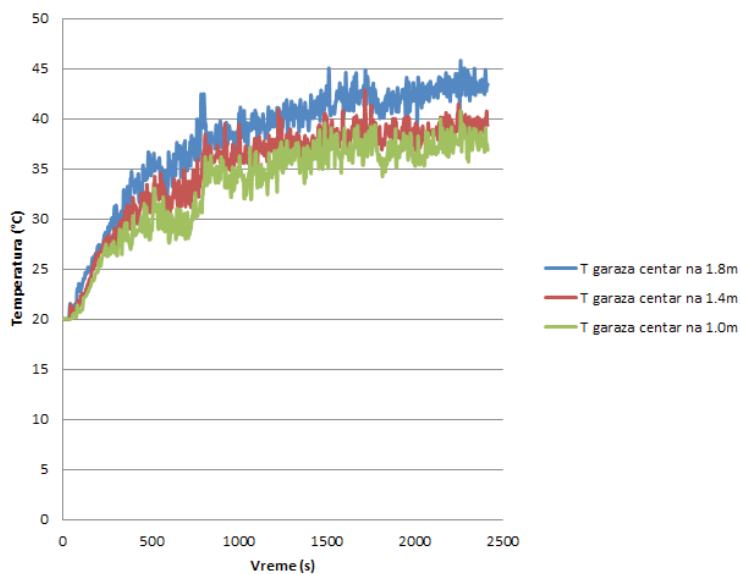
Slika 7: Razvoj temperature na ulaznim vratima objekta tokom simulacije

Temperature u unutrašnjosti objekta (garaže) razmatrane su na dva načina. Prvo, merene su temperature na gumama, koje su predstavljale jedino požarno opterećenje koje je zadato simulacijom, i u samom centru garaže da bi se došlo do saznanja koja bi vrsta materijala koja se eventualno nalazi još u garaži mogla da se zapali. Senzori koji su merili temperaturu na gumama su bili postavljeni na tri mesta, sa oznakama na grafiku na slici 8, na sledeći način:

- GUMA1 (senzor postavljen na gumi uz zadnji zid unutar garaže na visini od 1,75 m),
- GUMA2 (senzor postavljen na gumi uz zadnji zid unutar garaže na visini od 1,1 m) i
- GUMA3 (senzor postavljen na gumi uz prednji zid unutar garaže do prozorskog otvora na visini od 0,8 m), respektivno. Takođe, na slici 9 je prikazan grafik razvoja temperature u centru garaže.

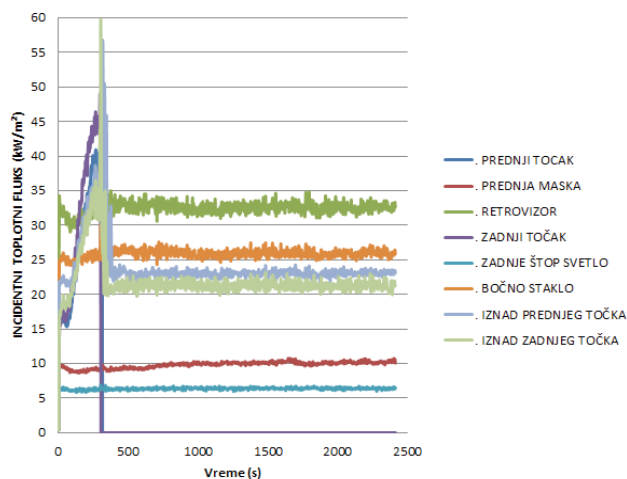


Slika 8: *Temperature koje su izmerene senzorima na naslaganim gumama u garaži*

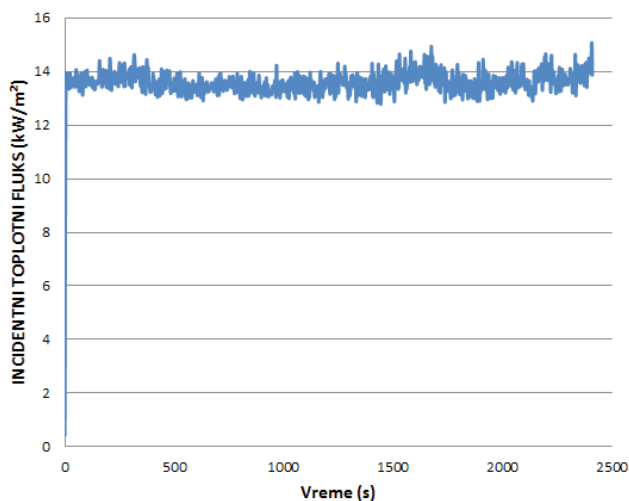


Slika 9: *Temperature u centru garaže*

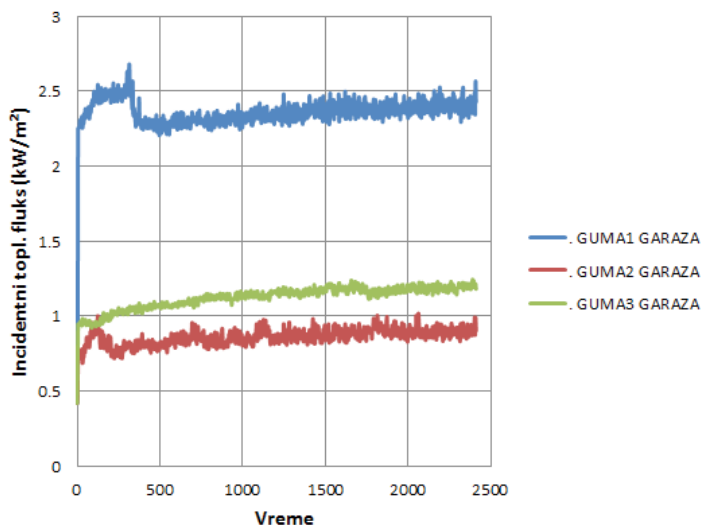
Imajući u vidu relativno visoku polaznu vrednost količine toplote koja se oslobađa tokom požara automobila, bilo je značajno da se utvrde pojedine vrednosti incidentnog toplotnog fluksa u pojedinim oblastima simulacije. Na slici 10 su prikazane vrednosti incidentnog toplotnog fluksa na susednom automobilu, a na slikama 11 i 12 vrednosti na vratima garaže i na gumama koje se nalaze u unutrašnjosti garaže.



Slika 10: Incidentni toplotni fluks na susednom automobilu



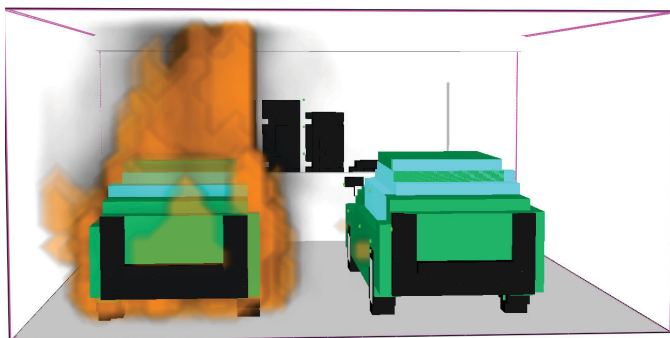
Slika 11: Incidentni toplotni fluks na ulaznim vratima



Slika 12: Incidentni toplotni fluks na gumama u garaži

3. Analiza rezultata dobijenih simulacijom

Rezultati koji su dobijeni simulacijom zavisili su pre svega od prethodno definisanih rastojanja susednog automobila i objekta, kao i od definisanih materijala konstrukcije objekta i materijala u unutrašnjosti objekta. Rezultati su nedvosmisleno pokazali da dolazi do paljenja susednog automobila, a da postoji veoma mala verovatnoća da se požar prenese u unutrašnjost objekta, što je pokazala i vizuelizacija simulacije u modulu *Smokeview*, slika 13.



Slika 13: Trenutak kada dolazi do paljenja prednje gume susednog automobila (~1,5 minut od početka simulacije razvijene faze požara)

Analiza dobijenih rezultata koji se odnose na razvoj temperature pokazuju sledeće:

- temperature koje su vladale na susednom automobilu su dovoljno visoke da izazovu paljenje plastičnih (kućiste retrovizora, branici, maska hladnjaka, štop svetla, pa čak i krila i haube, pošto su kod pojedinih marki izrađeni od plastike), gumenih (gume na točkovima, kederi na vratima, prozorima i gepeku...), a po oštećenju stakala i prodoru toplote u unutrašnjost susednog automobila i tekstilnih delova (tapaciri vrata, poda automobila, sedišta...);
- temperature na spoljnoj strani objekta su takve da osim pucanja stakla nisu mogle da izazovu veća oštećenja sa ovako definisanim materijalima; međutim, ako bi na fasadi bio prisutan drugi materijal, na primer plastika, drvo, guma ili tekstilna zavesa na prozorskim otvorima, postoji realna mogućnost da bi se požar proširio i na objekat; ovo posebno važi za ulazna vrata u garaži gde su zabeležene vrednosti temperature do 350°C, što se prema (<http://www.firebid.umd.edu/material-database.php>) može smatrati kritičnom vrednosti za slučaj da su vrata bila izrađena od drvenog materijala;
- temperature na gumama u garaži su u graničnoj oblasti vrednostima koje ne bi mogle da izazovu dalje paljenje samih guma i okolnog materijala, što važi i za temperature u centru garaže.

Do sličnih rezultata se dolazi i analizom toplotnog fluksa. Da bi toplota koja se prenosi zračenjem plamena dostigla granične vrednosti incidentnog toplotnog fluksa za pojedine materijale, one bi trebalo da imaju vrednosti iznad 12,5 kW/m². Vrednosti od 15 kW/m² do 60 kW/m², zabeležene su na skoro svim postavljenim senzorima na susednom automobilu (izuzev kod prednje maske i štop svetla gde su vrednosti incidentnog toplotnog fluksa iznosile od 6 kW/m² do 10 kW/m²), pa se susedni automobil može smatrati ugroženim sa aspekta zapaljenja incidentnim toplotnim fluksom. Na ulaznim vratima garaže zabeležene su vrednosti incidentnog toplotnog fluksa od oko 14,5 kW/m², ali s obzirom da se radi o metalnim vratima, ova vrednost za konkretni slučaj ne bi izazvala prenos požara sa zapaljenog automobila na objekat. Najzad, što se tiče unutrašnjosti objekta, vrednosti zabeleženog incidentnog toplotnog fluksa na uskladištenim gumama bile su u rasponu od 0,8 kW/m² do 1,3 kW/m², tako da objekat i uskladišteni materijal u njemu nisu ugroženi sa aspekta zapaljenja incidentnim toplotnim fluksom.

Zaključak

Iako je prvobitni motiv ovog istraživanja bio sasvim konkretan, da se simulacijom rekonstruiše događaj koji se ranije desio i da se dobijeni rezultati uporede sa video-zapisom koji prikazuje samo deo dešavanja tokom požara, ova studija slučaja ima daleko dublje implikacije. Analiza dobijenih rezultata je pokazala pod kojim uslovima (rastojanja, požarno opterećenje vozila i objekta u neposrednoj blizini) može da dođe do prenošenja požara. S druge strane, prikazanim istraživanjem je postavljena dobra osnova za dalja istraživanja u nekoliko pravaca, od kojih se izdvajaju dva pravca koja se odnose, pre svega, na projektovanje parkinga i zatvorenih garaža: definisanje bezbednog rastojanja između vozila i definisanje građevinskih karakteristika elementa objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini.

Literatura

1. Collier P. C. R; *Car parks – Fires involving modern cars and stacking systems*, Branz study report SR 255 (2011), New Zealand, 2011.
2. European Commission, *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks*, report EUR 18867 EN, 2004.
3. NFPA 502-2014 *Road tunnels, bridges, and other limited access highways*, NFPA, USA, 2014.
4. Schleich et al., *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks*, European Commission, Luxembourg, 1999.
5. Southwest research institute, *Development of a database of full-scale calorimeter tests of motor vehicle burns*, final report, Motor vehicle fire research institute, VA USA, 2008.
6. Spearpoint M. J., Tohir M. Z. M., Abu A. K., P. Xie, *Case Studies in Fire Safety* 3, Elsevier, 2004, pp. 44–50 (journal homepage: www.elsevier.com/locate/csfs).
7. Yuguang L., *Assessment of Vehicle Fires in New Zealand Parking Buildings*, *Fire Engineering Research Report*, 04/2, New Zealand, 2004.
8. Blagojević M., Radovanović R., Roganović S., *Forensic Study of The Short Circuit as a Cause of Fire*, pp. 79–96, *NBP Journal of Criminalistics and Law*, Vol. XV, N°1, Criminal Justice and Police Academy, Belgrade, 2010.

SIMULATION OF MOTOR VEHICLE FIRES IN FORENSIC ENGINEERING

Darko Zigar¹

University of Niš

Faculty of Occupational Safety

Milan Blagojević²

University of Niš

Faculty of Occupational Safety

Radovan Radovanović³

Academy of Criminalistic and Police Studies, Belgrade

Abstract: Motor vehicle fires represent a specific field of research within scientific field of fire protection. A considerably larger part of this research is dedicated to the causes of vehicle fires and the manners of their detection. However, little attention is dedicated to research of potential fire development once it has already started and the possibilities of its transferring to nearby materials and objects. This type of research is aimed at determining “safe” distance from a vehicle on fire in order to postpone as much as possible or prevent igniting of surrounding materials, vehicles and parts of nearby facilities.

The results of this type of research can be applied on determining „safe“ distance when designing parking lots, subterranean garages and generally the spaces where several parked vehicles can be found or in cases a facility is located in their vicinity.

Keywords: vehicle fire, fire simulation, Fire Dynamics Simulator (FDS), fire expertise

1 Assistant professor, darko.zigar@znrfak.ni.ac.rs

2 Full professor, milan.blagojevic@znrfak.ni.ac.rs

3 Full professor, radovan.radovanovic@kpa.edu.rs

